

## HEV용 DC-DC 컨버터의 하우징 최적 설계 연구

김윤성\*, 서기봉\*, 이용화\*, 백병덕\*  
 동아일렉콤 선형기술연구소\*

### Housing optimal design researches of DC-DC converter for HEV

Yun-Sung Kim\*, Ki-Bong Seo\*, Yong-Hwa Lee\*, Byung-Dug Baeg\*  
 Dongahelcomm R&D center\*

**Abstract** - This paper reports the case that unitizes heat analysis simulation in housing design of DC-DC converter. Icepak4.3 is used for heat analysis simulation program. 1.5kW prototype is produced with base of finally selected structure through simulation and is compared heating characteristic. Propriety of development application is confirmed through the result, shortening case of development cost and period is introduced.

#### 1. 서 론

HEV에서 DC-DC 컨버터는 기존 차량 부품에 신규로 추가되는 장치이며 100A 이상의 대용량 전류를 출력하기 때문에 장착 위치나 장착 구조, 컨버터의 외관 구조, 무게, 부피 등의 제약이 따른다. 또한 공랭 조건인 경우 Air-flow 증가는 차량 내부 소음에 악영향을 미치기 때문에 제한적인 범위에서 사용된다. 따라서 한정된 외관 구조 및 무게, 부피 사양을 가지고 고효율의 전력 변환 사양을 만족해야만 한다.

이러한 DC-DC 컨버터 개발에 있어서 효율 및 출력 안정도를 확보하기 위한 회로 방식 선정과 주요 발열 소자의 선정은 매우 중요하며 특히 하우징의 구조 설계는 단위 부품의 발열 특성에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 따라서 제한적 공간과 중량을 사용하여 최적의 하우징 구조를 설계하는 것은 컨버터의 내구 신뢰성에 중요한 영향을 미치게 된다. 반면 이러한 하우징 설계는 냉각용 방열 핀의 두께, 길이, 핀 간격 등 다양한 변수를 가지고 있기 때문에 다양한 구조의 시제품을 비교 시험하기 위해서는 많은 개발비용과 개발기간이 필요하게 된다. 또한 다양한 시제품을 실제로 제작하여 확인해 보는 것에는 한계가 있기 때문에 최종으로 만들어진 제품이 최적 설계 되었다고 판단하기 어렵다.

따라서 열 해석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 예상되는 손실과 주변 조건을 적용하고 초도 시제품의 열 특성과 열 해석 결과를 동기 시킬 수 있다면 다양한 구조의 열 해석 결과를 빠른 시간 안에 얻을 수 있을 것이며 그 결과를 상대적으로 비교하여 우월한 구조를 최종 제품에 적용 할 수 있을 것이다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 DC-DC 컨버터 사양

본 논문에서 개발한 DC-DC 컨버터의 사양은 소형, 준중형 차량에 적합한 전기적 용량이며 세부적인 사양은 표1과 같다.

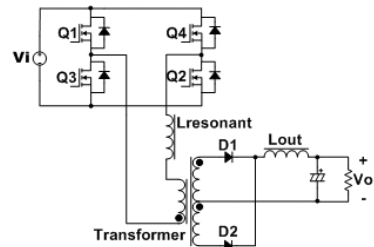
〈표 1〉 DC-DC 컨버터 사양 전압 [V<sub>DC</sub>]

입력전압	정격입력	출력전압	정격출력	출력전력	냉각방식
130~200V	150V	13.9~14.7V	14.3V	1.5kW	강제공랭
최대효율	최대출력효율	목표무게	목표부피	동작온도	High/Low
92%	89%	2kg	2.5L	-40~65℃	Isolation

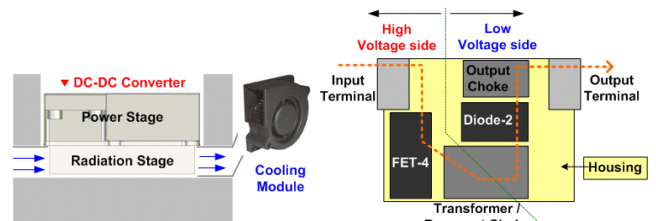
이와 같은 사양을 만족하기 위해서 DC-DC 컨버터의 회로 방식은 그림1 과 같은 Isolation Phase Shift Full-Bridge Topology를 적용하였다. Full-Bridge Topology의 주요 발열 소자는 1차 측 FET 4개, Transformer(변압기), Resonant Choke(공진초크), 2차 측 Diode 와 Output Choke(출력초크)로 구성된다. 특히 2차 측 정류 회로는 Center-Tap 방식을 사용하였으며 출력 전류 용량과 발열 특성을 고려하여 2개의 Diode를 사용하였다.

그림2.a는 컨버터의 외각 형상에 따른 냉각 구조 이다. Power Stage는 주요 부품이 실장 되어 있는 전원부 이며, Radiation Stage는 방열

핀이 배치 될 하우징부 이다. 주변 회색 영역은 차량 내의 다른 부품들이 밀집되어 있는 구조를 나타낸 것이며 Cooling Module을 통해 발생된 Air-flow는 각 차량 부품들과 bracket등을 통해 손실 없이 Radiation Stage의 방열 핀을 통해서만 흐른다. 주요 발열 소자는 1차 측 회로 군과 2차 차 측 회로 군의 루프 구조에 맞추어 그림2.b와 같이 배치되었으며 2차 측 다이오드 측은 100A 이상의 대 전류가 흐르기 때문에 Bussbar를 이용하여 설계 하였다. 그림의 점선은 Current-flow를 간단하게 나타낸 것이다.



〈그림 1〉 Phase Shift Full-Bridge Topology 등가 회로



2.a  
 2.b  
 〈그림 2〉 컨버터 냉각구조 및 주요 발열소자 배치

하우징 설계는 크게 부품이 실장되는 Top-Side의 구조 설계와 Air-flow를 위한 방열 핀이 구성되는 Bottom-Side로 나눌 수 있다. 단, Top-Side는 주요 부품들의 높이와 Bussbar 구조에 제약을 받으며 Bottom-Side는 차량 장착 구조에 제약을 받게 됨으로 설계 시 주의해야 한다.

##### 2.2 초도 열 해석

열 해석 시뮬레이션을 위해서는 부피 조건 및 손실 조건이 가장 우선적으로 필요하다. 본 개발의 경우 Power Stage의 높이가 40mm 이내이며 Radiation Stage의 경우는 높이 25mm, 가로 140mm, 세로 162mm 이내의 공간에서 설계해야 한다.

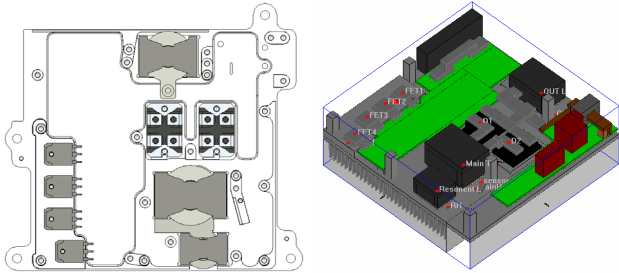
손실은 정격 입력 전압 조건 시 최대 출력 부하의 손실을 적용한다. 1.5kW의 최대 출력 시 효율은 89%가 예상 되며 이때 컨버터의 손실은 약 185W가 된다. 회로 시뮬레이션 및 손실 계산을 통해 주요 발열 소자의 손실은 각각 표2와 같이 예상 할 수 있으며 열 해석을 위한 손실 값으로 사용하였다. 또한 본 논문에서는 주요 부품의 열전도율 및 비열, 밀도 등은 제조업체의 사양을 참조 하였다.

〈표 2〉 예상 손실 전력

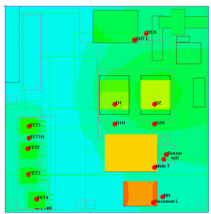
항목	FET4개	트랜스	공진초크	다이오드2개	출력초크	기타
손실	54W	9W	7W	110W	1.5W	3.5W

위와 같은 조건에서 두꺼운 Bussbar를 회로 패턴으로 사용하고 있고 각 부품의 높이가 컨버터 최대 높이사양을 통해 제한되고 있기 때문에

부품과 접촉해 있는 하우징의 높이는 가장 낮은 곳과 높은 곳의 차이가 10mm 이내로 설계 되었다. 아래 그림3은 각 부품의 손실과 사이즈를 고려하여 설계된 하우징 Top-Side 설계 결과의 3D 모델링과 열 해석 모델링이다. 초도 열 해석 시 하단 방열 핀은 최대 무게 사양을 고려하여 핀 두께 2mm, 간격 7.5mm로 임의 선정하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 입력 150V<sub>DC</sub>, 출력1.5kW, 주변온도27°C, Air-flow 55CMH 조건으로 실시하였다.



3.a <그림 3> Top-Side 설계구조 및 열 해석 모델링



<그림 4> 초도 열 해석 결과

항목 [단위 °C]	초도 열 해석	초도 시제품	열 해석 ΔT
FET	69.47	72.20	-2.73
Transformer	96.41	98.20	-1.79
Resonant Choke	101.22	98.10	3.12
Diode	82.58	90.31	-7.72
Output Choke	66.14	70.00	-3.86
Housing	58.77	59.00	-0.23

<표 3> 초도 열 해석 결과 비교

그림4는 초도 열 해석 결과이며 대부분의 온도는 50~80°C구간에 분포 하지만 Transformer와 Resonant Choke의 온도가 90°C도 이상으로 분포 되는 것을 확인 할 수 있다. 초도 열 해석의 경우 주요 부품의 손실 값 적용 후 주변 환경 변수는 실제 시제품의 결과에 맞추어 미소 조정 하였다. 표3은 열 해석 결과와 실제 제작된 초도 시제품의 열 특성을 비교 해본 결과이다. Diode의 온도 차이가 -7.72°C로 가장 크며 다른 부품의 온도는 ±5°C이내의 차이를 볼 수 있다. 시제품의 측정 오차 등을 감안 할 경우 열 해석 결과의 신뢰도가 비교적 높다고 할 수 있다. 따라서 초도 열 해석의 주요 특성 변수들을 고정 하고 하우징의 구조만을 변경하면서 그 결과를 비교할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 제작 된 초도 시제품의 무게를 분석한 결과 표4와 같이 각종 부품 및 Top-cover의 무게가 1130g, 하우징 무게가 630g 이었으며 목표 사양 범위 내에서 하우징을 최적화 시킬 수 있는 무게 마진은 240g이며 최종 870g 이하로 설계되어야 한다.

<표 4> 초도 시제품 무게 분석 결과

항목	PCB & 부품	Top-cover	Housing	합계	무게마진
무게	940g	190g	630g	1760g	240g

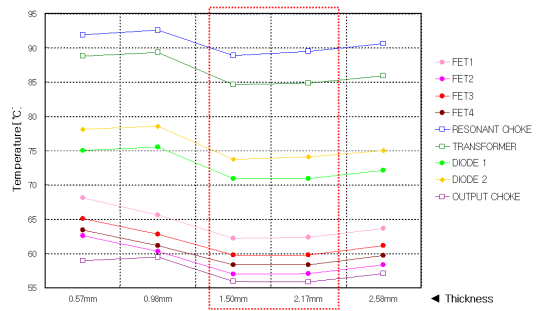
### 2.3 구조에 따른 열 해석

하우징 구조 변경에서 높이와 길이는 컨버터의 허용 부피의 최대 범위로 선정 한 후 두께와 간격을 최적화시키기 위한 방향으로 검토 하였다. 따라서 높이 25mm, 길이 160mm를 고정 값으로 선정 하였다.

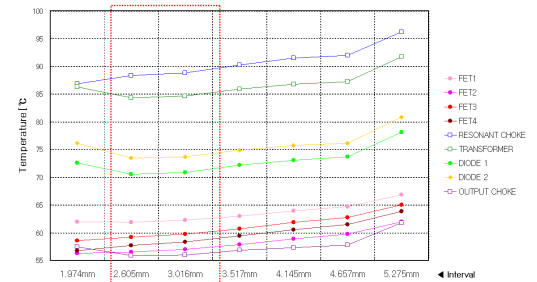
그림5는 핀 간격을 임의로 3mm로 고정하고 핀 두께를 0.5~2.5mm 까지 변경하면서 열 해석한 결과이다. 그래프의 점선 영역의 1.5~2.0mm 구간이 가장 열 특성이 우수한 것을 알 수 있다. 1.5mm구간부터 하우징의 체적 효과가 효율 적으로 나타나는 것으로 보이며 2.0mm이상의 경우 방열 핀의 체적 효과 보다는 Air-flow의 흐름을 방해하는 효과가 커지는 구간으로 판단된다.

그림6은 앞 선 해석을 토대로 핀 두께를 1.5mm로 선정 한 후, 핀 간격을 1.9~5.2mm 까지 변경하여 해석한 결과이다. 핀 간격이 좁을수록 열 특성은 우수한 결과를 볼 수 있으나 2.5mm이하의 구간에서는 일부 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 이 구간 역시 방열 핀의 체적 효과 보다는 Air-flow의 흐름을 방해하는 효과가 커지는 구간으로 판단된다.

이와 같은 열 해석 결과를 토대로 하우징의 구조를 선정 할 경우 두께 1.5~2.0mm, 간격 2.5~3.0mm가 적절 하다는 것을 알 수 있다. 이때 각 경우의 무게를 분석 해 보면 표5와 같이 예상 할 수 있고 최종 무게 사양을 만족하기 위해서는 870g 이하로 설계 되어야 하므로 두께 1.5mm, 간격 3.0mm를 선정하는 것이 적합하다.



<그림 5> 방열 핀 두께에 따른 열 해석



<그림 6> 방열 핀 간격에 따른 열 해석

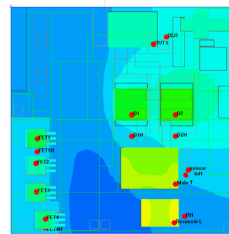
<표 5> 구조 별 예상 무게 분석

구분	Thickness 1.5mm Interval 3.0mm	Thickness 1.5mm Interval 2.5mm	Thickness 2.0mm Interval 3.0mm	Thickness 2.0mm Interval 2.5mm
무게	860g	910g	1030g	1100g

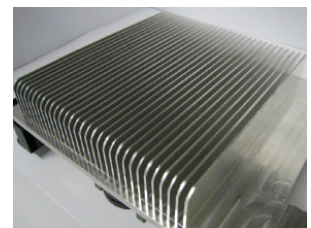
### 2.4 개선 구조 열 해석

그림7.a는 개선 선정된 하우징 구조의 열 해석 시뮬레이션 결과이다. 그림4의 초도 열 해석 결과와 등온분포를 비교해 보면 50°C이하의 온도 영역인 청록색 및 파란색의 분포가 현저히 늘어 난 것을 확인 할 수 있다. 그림7.b는 실제 밀링 가공하여 제작한 시제품의 하우징 하단 방열 핀 구조이다.

표6은 주요 부품의 온도결과이며 Resonant Choke의 온도차이가 6.5°C로 가장 큰 차이를 보이고 있지만 대부분의 부품의 온도 차이가 ±5°C이내 인 것을 확인 할 수 있다. 따라서 열 해석 결과가 하우징 구조 변화에 따른 컨버터의 온도경향을 판단하기에 무리가 없음을 재차 확인할 수 있다. 또한 개선 시제품의 온도가 초도 시제품의 온도 대비 평균 10~15°C 개선 된 것을 알 수 있고 열 해석을 통해 선정된 구조가 열 특성 개선에 효과적인 것을 확인 할 수 있다.



7.a



7.b

<그림 7> 개선 구조 열 해석 결과 (두께:1.5mm, 간격:3.0mm)

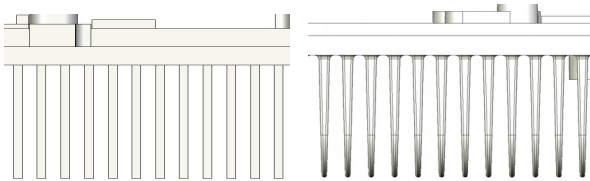
<표 6> 개선 구조 열 해석 결과 비교

항목 [단위 °C]	개선 구조 열 해석	개선 구조 시제품	열 해석 ΔT	항목 [단위 °C]	개선 구조 열 해석	개선 구조 시제품	열 해석 ΔT
FET1	62.23	58.70	3.53	Transformer	84.60	79.80	4.80
FET2	56.98	55.30	1.68	Diode1	70.88	71.00	-0.12
FET3	59.75	57.40	2.35	Diode2	73.69	77.40	-3.71
FET4	58.30	55.70	2.60	Output Choke	55.95	58.00	-2.05
Resonant Choke	88.83	82.30	6.53	Housing	46.47	46.70	-0.23

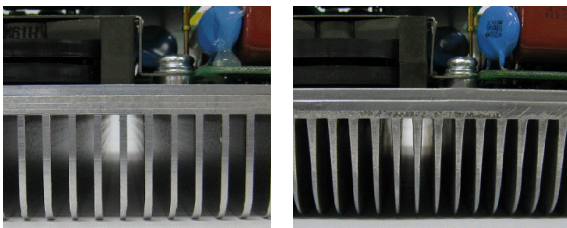
## 2.5 다이캐스팅 설계

본 개발의 목표는 양산 차량에 적용 할 수 있는 성능과 내구성을 확보한 컨버터를 개발하는데 있으며, 동시에 제품의 단가 경쟁력 및 제조수율을 고려하여 개발 하는 것이다. 따라서 개선 선정된 하우징 구조를 다이캐스팅 가공법에 맞추어 최적화 시킬 필요가 있다. 다이캐스팅은 금형을 이용한 가공법의 특성상 가늘고 긴 직사각형 구조를 만드는 데는 한계가 있다. 따라서 그림8.a와 같은 개선 선정된 구조의 밀링 가공 하우징을 그림8.b와 같이 구배 구조의 다이캐스팅 하우징으로 변경하여야 한다. 구배 구조의 방열 핀은 중심 축 두께가 1.5mm를 기준으로 시작점은 약 2.0mm, 끝점은 약 1.0mm로 설계 되었다. 핀 축 기준 간격은 밀링가공 하우징과 동일하게 적용 하였다. 그림9는 각 구조의 실제 제작된 하우징의 방열 핀 형상이다.

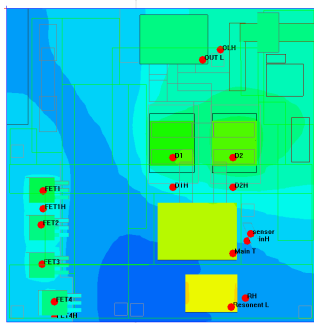
그림10는 다이캐스팅 하우징 구조로 변경 후 열 해석 한 결과이다. 대체적인 등온분포는 밀링가공 하우징 결과와 유사하다. 표6은 주요 부품의 온도 결과이며 열 해석 결과와 실제 시제품의 열 특성 차이는  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  내외로 열 해석 결과의 활용이 타당한 것을 알 수 있다. 단, 주요 부품의 온도 평균은 밀링 가공 하우징에 비해 약  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$  온도 상승이 되었다.



8.a 8.b  
 <그림 8> 개선 선정 하우징 구조와 다이캐스팅 구조 비교



<그림 9> 시제품 방열 핀

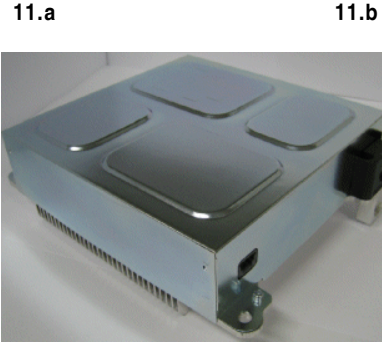
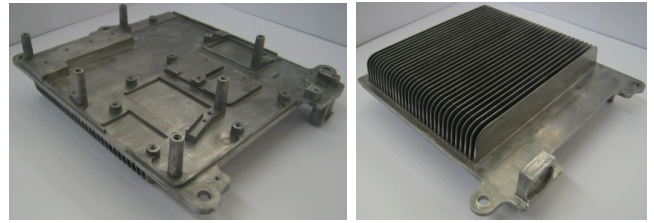


<그림 10> 최종 다이캐스팅 가공 시제품 열 해석 결과

<표 6> 다이캐스팅 열 해석 결과 비교

항목 [단위 $^{\circ}\text{C}$ ]	다이캐스팅 열 해석	다이캐스팅 시제품	열 해석 $\Delta T$	항목 [단위 $^{\circ}\text{C}$ ]	다이캐스팅 열 해석	다이캐스팅 시제품	열 해석 $\Delta T$
FET1	63.20	57.40	5.80	Transformer	85.74	79.90	5.84
FET2	58.96	56.50	2.46	Diode1	74.99	74.70	0.29
FET3	61.38	58.50	2.88	Diode2	78.25	77.90	0.35
FET4	59.72	56.60	3.12	Output Choke	60.61	59.40	1.21
Resonant Choke	91.96	86.20	5.76	Housing	46.84	50.40	-3.56

그림11은 최종 완성된 다이캐스팅 하우징 및 완성된 컨버터 시제품 실사이다. 그림11.a는 주요 방열 소자의 손실 및 사이즈에 맞추어 높이를 다양하게 고려하여 설계된 Top-Side이다. 또한 그림11.b는 중심 축 두께 1.5mm, 간격 3.0mm, 총 핀 수 31개의 구배 구조 방열 핀이 설계된 Bottom-Side이다. 그림11.c의 최종 시제품은 무게 2kg이하, 부피 2.5L이하로 최종 개발되었다.



11.a 11.b 11.c  
 <그림 11> 최종 다이캐스팅 시제품

## 3. 결 론

본 논문에서는 HEV용 DC-DC 컨버터에 적합한 전기적 사양 및 외관을 선정 후 주요 방열 소자의 열 손실을 적용하여 열 해석 시뮬레이션 프로그램인 Icepak의 결과를 하우징 구조 설계에 활용한 사례를 보고 하였다. 개발 컨버터의 최대 용량은 1.5kW급 이며 강제공랭 방식이다. 열 손실은 계산 및 회로 시뮬레이션을 통해 예상 하였다.

열 해석의 첫 번째 단계는 각 주요 부품들의 손실 및 부품 사이즈를 고려하여 Top-Side의 배치를 설계한 후 Bottom-Side의 방열 핀 구조를 임의로 선정 하였다. 임의 선정된 설계 구조를 이용하여 초도 시제품을 제작하였고 열 해석 결과와 초도 시제품의 결과를 비교하였다. 한편 손실을 제외한 시뮬레이션 변수는 초도 열 해석 과정에서 일부 선정 후 고정 하였고, 초도 열 해석 결과와 초도 시제품의 열 특성을 평균  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  이내의 오차로 고정하여 표준 열 해석 변수 기준을 확정하였다.

두 번째 단계는 초도 열 해석 단계를 통해 하우징 구조를 제외한 시뮬레이션 변수를 고정한 상태에서 Bottom-Side의 방열 핀의 두께, 간격을 다양하게 변화 시켜 가면서 주요 부품들의 온도 변화를 비교 하였다. 상대 비교한 열 해석 결과와 무게 계산 자료를 기준으로 최종 두께 1.5mm, 간격 3mm의 방열 핀 구조를 선정 하였다. 선정된 하우징 구조의 열 해석 결과와 이를 토대로 제작된 개선 하우징 시제품의 열 특성 비교 결과 전반적으로  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  이내의 오차를 확인 하였고 초도 시제품 대비  $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 의 온도 개선 효과를 확인 하였다.

마지막 단계로, 선정된 하우징 구조를 다이캐스팅 가공법에 적합하게 수정 한 후 열 특성을 확인 하였고 마찬가지로 열 해석 결과와 실제 제품과의 편차가  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  내외인 것을 확인 할 수 있었다. 실제 제품의 온도는 밀링 가공 시제품에 비해  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$  상승 하였다. 이는 방열 핀의 구배 구조의 차이와 다이캐스팅 가공법의 특성상 하우징의 밀도가 미소하게 차이가 나는 것이 원인으로 판단된다. 최종 제작된 다이캐스팅 시제품은 총 무게 2kg이하, 부피 2.5L이하로 개발 되었으며 동작 온도 범위에서 안정적으로 동작하는 것을 확인 할 수 있었다.

따라서 본 개발에서 적용한 사례의 경우처럼 주요 방열 소자의 손실 적용과 초도 설계 동기화 작업등의 비교적 간단한 작업을 통해서도 기구물의 구조나 배치, 부품의 손실 등에 따른 상대적 열 특성 변화를 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 개발에서는 1차 초도 시제품 제작, 2차 개선 하우징 시제품 제작의 밀링 가공 샘플 단계를 통해 한정된 공간 내에서의 효율적인 구조를 선별 할 수 있었다. 게다가 열 해석 시뮬레이션의 다양한 결과를 토대로 수개월의 금형 제작 기간이 필요한 다이캐스팅 하우징 설계를 시행착오 없이 개발 할 수 있었으며 이를 통해서 개발비용 및 개발 기간의 효율을 향상 시킬 수 있었다.

## [참 고 문 헌]

[1] Evgenji Rudnyi, "Electronic Cooling with ANSYS Icepak: Case Study of a Control Unit", 3<sup>rd</sup> European Automotive CFD Conference, EACC2007, 217-222, 4-6 July 2007.